

斜坡地基静力触探试验离散元分析^①

彭 镒^{1,2,3}, 蒋明镜^{1,2,3}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:通过二维离散元模拟斜坡地基静力触探试验, 研究试验过程中锥尖阻力的变化以及斜坡地基的宏微观力学响应。结果表明: 归一化锥尖阻力峰值在坡角较小时无明显提升, 在坡角足够大时提升明显, 稳定值随着坡角增大略微减小, 说明斜坡边界对表层土力学性能影响明显, 而对深层土影响较弱; 锥尖贯入过程中, 斜坡地基探杆两侧土体变形不对称, 坡上一侧膨胀, 坡下一侧压缩, 不对称性随着坡角增大而增大; 贯入到表层时, 探杆两侧微观接触力链不对称, 坡上一侧具有更大应力, 但当贯入到深层时力链趋向于对称, 其临界深度随着坡角增大而增大, 与坡角呈近似线性关系。

关键词: 斜坡地基; 静力触探试验; 离散单元法; 锥尖阻力; 宏微观力学特性

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 1-0057-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0563

Discrete Element Method Analysis of Cone Penetration Tests on Sloping Ground

PENG Di^{1,2,3}, JIANG Ming-jing^{1,2,3}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Much investigative work has been conducted on cone penetration tests on flat ground; however, research on cone penetration tests on sloping ground is scarce. Two-dimensional discrete element method simulation of cone penetration tests on sloping ground were performed, in which the tip resistance and micro-macro mechanical behavior of the cut slope was studied. The experimental results showed that the peak value of the normalized tip resistance does not increase when the slope angle is below a specific value, but increases when the slope angle is high. Nevertheless, the residual value decreases slightly with the increase of slope angle, indicating that the boundary of cut slope greatly affects the regolith, not the subsoil. As penetration proceeds, the deformation of the soil at the two sides of the cone is asymmetric with dilation on the upslope and compression on the downslope. This asymmetry increases with the slope angle. As the cone penetrates into the regolith, the force chains at different sides of the cone are asymmetric with higher stress on the upslope. However, as the penetration proceeds into the subsoil, the force chains tend to be symmetric. The critical depth of penetration symmetry increases with slope angle forming a linear relationship.

Key words: sloping ground; cone penetration test; discrete element method; core resistance; macro-micro mechanical behavior

① 收稿日期: 2015-04-21

作者简介: 彭 镒(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事砂土、深海能源土与生物诱导钙质胶结土微观本构模型和离散单元法分析研究。E-mail: di.peng.tongji@hotmail.com

0 引言

静力触探试验作为一种原位测试技术,可用于评定土的物理力学性质及其相关参数,且具有速度快、经济等优点,广泛用于软土、黏土、砂土和粉土等土层的勘探中^[1]。近年来岩土工作者依旧对静力触探试验展开研究,研究包括现场试验、模型试验与数值模拟三种。现场试验包括静力触探设备改进^[2]、静力触探成果整理方法讨论^[3-4]以及基于静力触探试验结果的场地特性评价与工程设计决策^[5-6];模型试验以离心机试验^[7-9]与缩尺试验^[10-11]为主,着重研究锥尖阻力与土体密实度、贯入速度等影响因素的关系;数值模拟以有限元法^[12-18]为主,通过适当的有限元模型,能在一定程度上模拟诸如分层土的特性。然而,上述静力触探试验研究针对的都是水平地基场地上的垂直贯入试验,几乎没有斜坡地基的静力触探试验研究,而且对于倾斜贯入试验的研究都较少。如 Wei 等^[19-20]运用三维有限元法,对正常固结土进行由竖直到水平的不同贯入倾角的静力触探试验,研究锥尖阻力的影响因素;蒋明镜等分别利用模拟月壤展开倾斜贯入试验^[21],并利用离散单元法模拟锥尖倾斜贯入砂土过程中土体的宏微观力学特性^[22],取得了一定成果。斜坡在土钉墙、边坡锚杆支护等场地中较为常见,平整场地静力触探试验成果是否能够直接用于斜坡还未有定论,因此有必要对斜坡地基静力触探试验贯入机理展开研究。此外,有限元法在对土体微观特性(如土颗粒接触力、土颗粒位移场等)的反映上具有局限性,因此有必要寻找更为有效的方法。

离散单元法由 Cundall 和 Strack^[23]于 1978 年首次提出,它将土体视为离散土颗粒的堆积体,通过牛顿力学基本原理模拟土颗粒间作用,从而反映整个土体的力学特性。相比传统有限元法,离散元法在分析破坏与大变形问题具有显著优势,作为一种新兴的数值方法被广泛用于各类疑难土体力学特性与本构理论^[24-27]乃至静力触探试验研究^[28-30]中。因此本文拟采用离散单元法,研究锥尖贯入斜坡地基过程中锥尖阻力变化规律以及地基土体宏微观力学响应,并与前人静力触探试验成果对比,分析斜坡地基情况下静力触探试验特性。

1 斜坡静力触探试验离散元模型

首先,采用离散元软件 PFC2D,利用分层欠压法^[31]生成一个均匀的、颗粒总数 200 000 的离散元

模拟地基。颗粒级配曲线如图 1 所示,相关参数如表 1 所示。为使砂土的内摩擦角接近真实情况,引入 Jiang 等提出的二维砂土颗粒抗转动模型^[32],模型参数(表 1)参照 Jiang 等^[32]的离散元模拟参数。生成地基后,为节省计算时间,在 20 倍重力加速度下完成固结后,地基宽 4.0 m,高 2.762 m。地基最大颗粒重叠比(颗粒重叠量/颗粒平均粒径)约为 4.52%,地基自重应力如图 2 所示,接近理论值,均满足要求。选取与地基参数相同的 6 000 颗粒,组成柔性边界的双轴试样,在 50 kPa、100 kPa 和 200 kPa 三种围压下,以 10.0%/min 的应变速率加载,得到地基土试样峰值内摩擦角为 36.76°,残余内摩擦角为 19.47°。

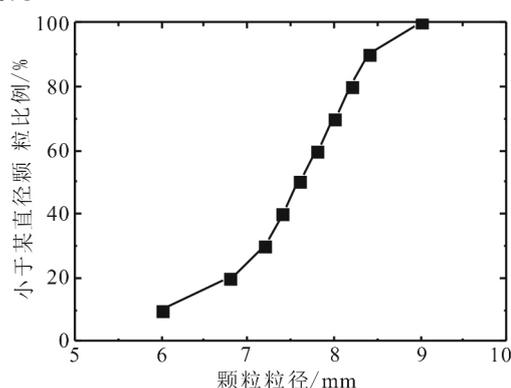


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution

表 1 地基土颗粒参数

Table 1 Particle parameters of ground soil

参数	数值
粒径范围	6.0~9.0 mm
平均粒径	7.6 mm
不均匀系数	1.3
颗粒密度	2.6 g/cm ³
法向接触刚度	4.0×10 ⁸ N/m
切向接触刚度	3.0×10 ⁸ N/m
粒间摩擦系数	1.0
颗粒抗转动系数 ^[32]	1.5

本文贯入试验采用的斜坡地基,通过削除上述地基的部分土体得到。削除示意图如图 3 所示。如果地基左下角点为原点,则以坐标(2.0, 1.6)(单位:m)为中心,以坡角为与 x 轴夹角的一组直线为削除边界线。分别按不同的削除边界切削上述地基,重新固结后即可得到斜坡地基。本文研究的坡角分别为 0°(用于与已有成果对比)、10°和 20°。

探杆由四个 PFC2D 的墙单元组成,直径 0.16 m,长度 2.4 m,法向刚度 1.5×10¹⁰ N/m,切向刚度 1.0×10¹⁰ N/m,表面光滑。探杆墙与土颗粒的接

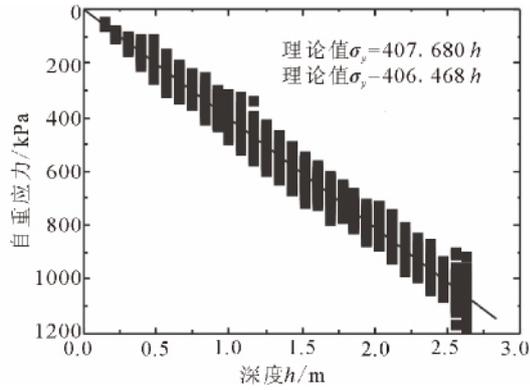


图 2 地基自重应力分布

Fig. 2 Gravity stress distribution of the ground

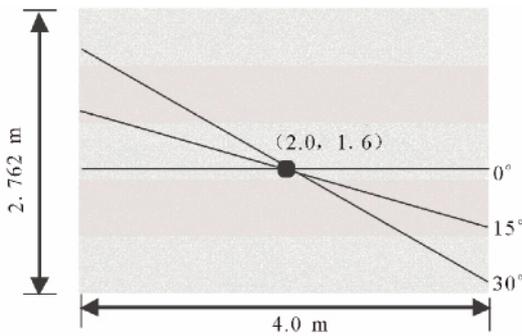


图 3 削坡过程

Fig. 3 The process of slope cutting

触,采用的是 PFC2D 自带的线弹性接触模型。文献[8]的研究表明,地基宽度大于 40 倍锥尖半径时边界效应对试验结果的影响可以不计,而本文中地基宽度与锥尖半径的比值 $W/R=4.0/0.08=50 > 40$,边界效应的影响可忽略。对于前述形成的模拟斜坡地基,将探杆分别以 0.25 m/s、0.5 m/s 和 1 m/s 的速率向下贯入,模拟静力触探过程。斜坡地基和探杆的示意图如图 4 所示。

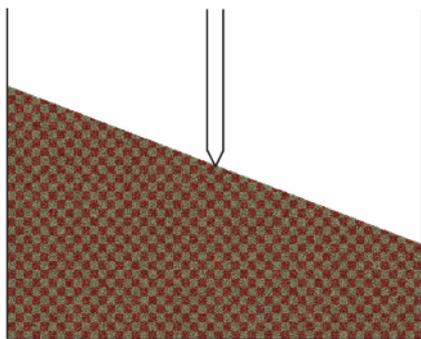


图 4 离散元模拟斜坡(坡角 20°)

Fig. 4 Simulation of slope using DEM (slope angle=20°)

2 模拟结果及分析

2.1 锥尖阻力特性

在二维离散元分析中,锥尖阻力的计算方式如下:

$$q_c = \frac{F_1 + F_2}{D} \quad (1)$$

其中 F_1 和 F_2 分别为图 4 中模拟锥尖的左侧和右侧墙所受法向力的竖直分力(因无锥尖摩擦); D 为锥尖直径。对于坡角 $\theta=0^\circ, 10^\circ$ 和 20° ,贯入速率 0.25 m/s、0.5 m/s 和 1 m/s,锥尖阻力分别如图 5 所示。其中贯入深度与贯入阻力均进行了归一化处理,即将贯入深度 y 除以锥尖截面半径 R ,而贯入阻力参照文献[22]的方法,除以贯入深度处对应土体的自重应力。从结果可以看出,归一化贯入阻力先增加,到达峰值以后逐渐降低,这与文献[21-22]的结果类似;随着贯入速率增加,贯入阻力增加,验证了文献[30]中离散元分析贯入试验需要考虑速率敏感性的观点;随着坡角增加,贯入阻力稳定值仅略有下降;坡角 10° 时贯入阻力峰值与平地(0°)差别不大,但当坡角到达 20° 时贯入阻力峰值出现明显上升。贯入阻力的峰值和稳定值分别代表浅层土体与深层土体的应力状态贯入阻力稳定值随坡角变化不大,表明斜坡边界对深层土体的应力状态影响有限;然而,贯入阻力峰值在坡角 10° 变化至 20° 的过程中发生了较大的变化,这可能是当坡角达到 20° 时,由于土体的残余内摩擦角不足 20° ,在静力触探过程中表层土体加载发生破坏后,达到残余状态不足以稳定倾角 20° 的斜坡,因而发生继续破坏,锥尖相应受到更大的抗力所致。

2.2 地基宏观力学特性

取贯入速度 0.5 m/s 的情况,分析研究不同坡角地基在锥尖贯入过程中地基土的力学特性。

图 6 和图 7 分别为地基网格变形与地基土颗粒接触力链信息。在锥尖贯入前,先将地基划分网格,然后间隔着色(图 4),以观察地基变形情况。从地基网格变形可以发现,在有坡角的情况下,较低一侧的土体在接近探杆的位置发生压缩,较高一侧的土体在接近探杆的位置发生膨胀,这说明斜坡地基位于探杆两侧的土体在加载过程中经历不同的变形过程。随着坡角的降低,锥尖两侧土体的变形差异将缩小,当坡角为零时锥尖两侧土体变形对称。从颗粒接触力链可以发现,平整场地下探杆两侧力链对称,与土体受力变形对称对应;当有坡角时在浅层土

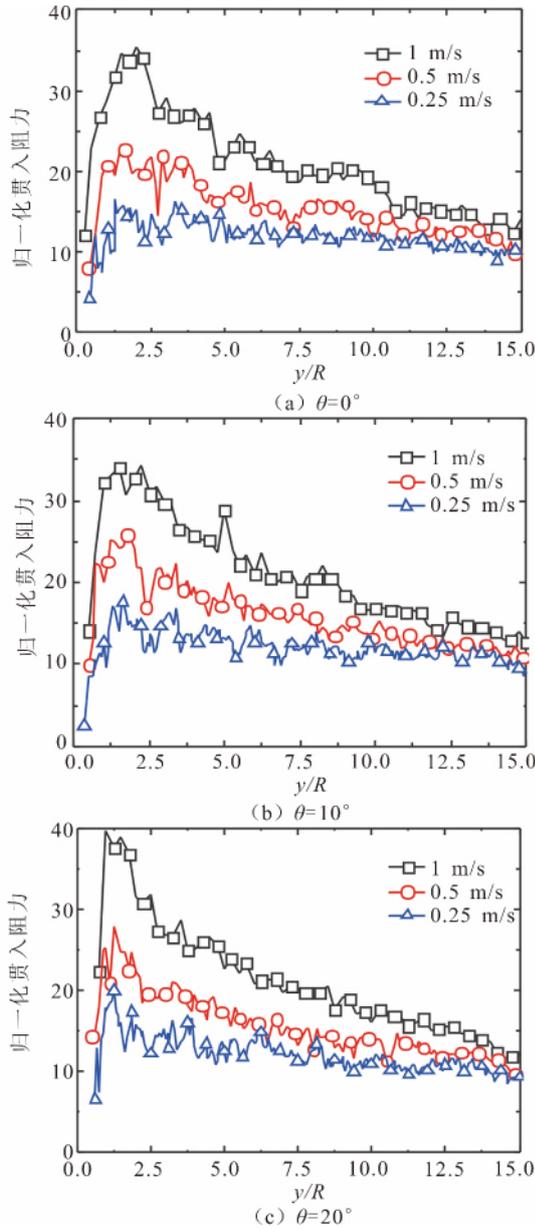


图5 归一化锥尖阻力随深度变化曲线

Fig. 5 Relationship between normalized cone tip resistance and penetration depth

体处探杆两侧力链不对称,坡上一侧力链较坡下一侧更为密集,说明同一深度处上侧应力水平大于下侧。但当探杆贯入到一定深度后,两侧力链趋向于对称,印证了上节中斜坡边界对深层土力学性能影响有限的结论。此外,通过对比 $y/R=11$ 、坡角 10° 与 20° 的力链可以发现,随着坡角增加,斜坡对土体力学性能改变的影响深度加大,这使得 20° 坡角下 $y/R=11$ 深度处探杆两侧土体受力状态依旧不一致。

下面进一步对斜坡影响深度进行量化研究。斜坡影响深度可以通过贯入过程中锥尖两侧土体力

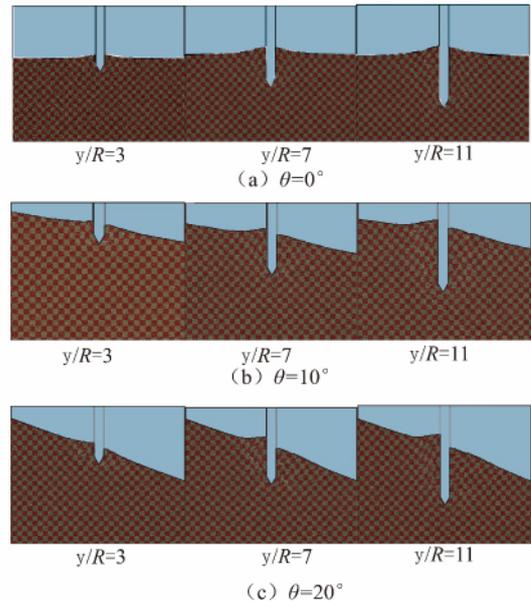


图6 地基网格变形

Fig. 6 Ground grid deformation

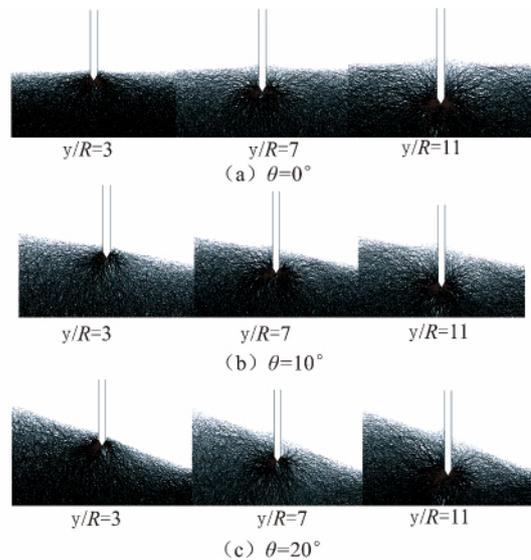


图7 地基颗粒接触力链

Fig. 7 Particle contact force chains of the ground

学特性由不对称变为对称的临界深度得到。这里我们选择两侧半锥尖所受到的力 F_1 和 F_2 作为评价指标,当 F_1 和 F_2 由具有明显差异首次变为一致或足够接近时,此深度即为临界深度,依旧使用归一化的深度 $(y/R)_{cr}$ 。图8为贯入速率 1 m/s 、坡角 0° 、 10° 与 20° 情况下两侧半锥尖所受阻力与贯入深度的关系。从图中可以看出,对于对称的平整场地(坡角 0°), F_1 和 F_2 自始至终差不多,可以认为临界深度 $(y/R)_{cr}=0$,这也与理论结果相符合;对于坡角 10° 和 20° 的情况, $(y/R)_{cr}$ 分别为 6.75 与 14.25 。图9

为临界深度 $(y/R)_{cr}$ 与坡角 θ 的关系,可以发现临界深度 $(y/R)_{cr}$ 与坡角 θ (单位:°) 之间有近似线性关系,可表达为: $(y/R)_{cr} = 0.705\theta$ 。这样的线性关系在相近试验中也存在,如蒋明镜等^[33] 的倾斜静力触探试验结果显示贯入阻力与贯入倾角呈线性关系。

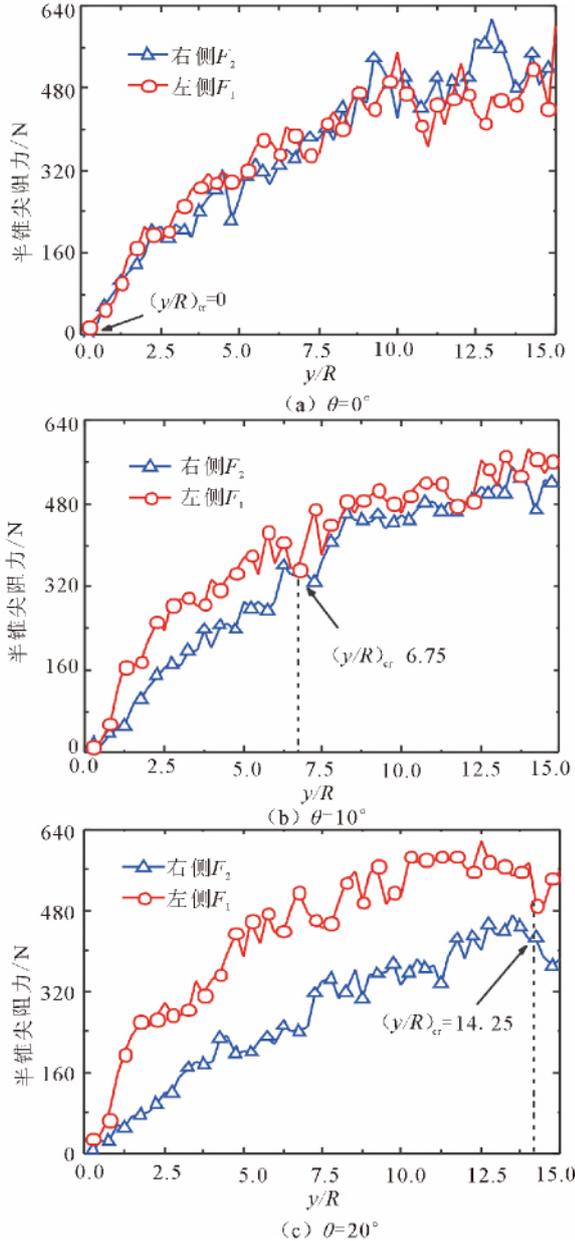


图 8 两侧半锥尖阻力与深度关系

Fig. 8 Relationship between semi-cone tip resistance of two sides and penetration depth

3 结语

本文通过二维离散元模拟斜坡地基上的静力触探试验,分析研究贯入阻力与地基土宏微观力学特性,并与水平地基场地的情况进行对比。结果表明:

(1) 贯入阻力与贯入速度呈正相关关系,静力

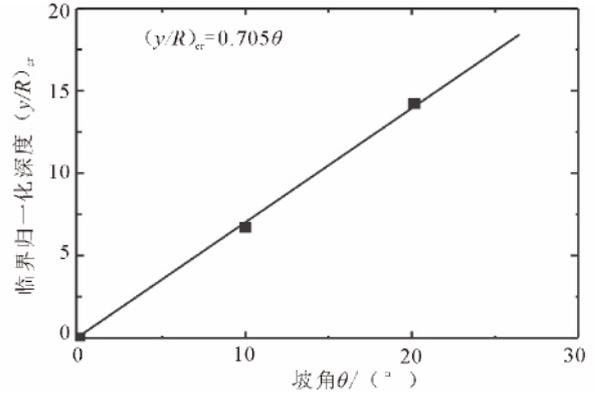


图 9 临界深度与坡角关系

Fig. 9 Relationship between critical depth and slope angle

触探试验离散元模拟应考虑这一因素。贯入阻力稳定值随坡角增加仅略有下降,说明斜坡边界对深层地基土力学特性影响有限;而贯入阻力峰值在 10° 坡角情况下提升不明显,却在 20° 坡角下明显提升,这可能与土体残余内摩擦角不足 20° 表层土体在静力触探加载后发生继续破坏有关。

(2) 斜坡地基静力触探试验过程中,探杆两侧土体变形不对称,坡上一侧靠近探杆的土体膨胀,而坡下一侧靠近探杆的土体压缩,且随着坡角增加不对称性增大;试验过程中斜坡地基探杆两侧土体颗粒接触力链不对称,坡上侧地基土具有更大应力,随着贯入进行到深层,接触力链渐趋对称,接触力链变为均匀的临界深度随着坡角增大而增大,说明斜坡边界对土体力学性能改变的影响深度随着坡角增大而增大。进一步通过对两侧半锥尖阻力的分析研究,发现此影响的临界深度与坡角呈现线性关系。

由于本文的研究着重于探究斜坡坡角与贯入速度变化对静力触探结果的影响,没有考虑不同土质斜坡的静力触探试验。对于这一问题的探讨,将在作者今后的工作中有所体现。

参考文献 (References)

- [1] 徐超,石振明,高彦斌,等. 岩土工程原位测试[M]. 上海:同济大学出版社,2005.
- [2] Frost J D, Martinez A. Axial-Torsional Multi-Sleeve Friction Penetration System for Lunar Subsurface Studies[C]//Earth and Space 2012@ struction, and Operations in Challenging Environments. ASCE,2012;335-343.
- [3] Firouziandbandpey S, Ibsen L B, Andersen L V. CPTU-based Geotechnical Site Assessment for Offshore Wind Turbines—a Case Study from the Aarhus Site in Denmark[C]//International Ocean and Polar Engineering Conference2012,2012;151-158.
- [4] Cheng Y, Liu S, Liu Z, et al. Seismic Cone Penetration Test As-

- assessment of Vibratory Probe Compaction for Liquefaction Mitigation[C]//GeoCongress 2012@ sState of the Art and Practice in Geotechnical Engineering. ASCE 2012;1898-1907.
- [5] Bol E. The Influence of Pore Pressure Gradients in Soil Classification During Piezo Cone Penetration Test[J]. Engineering Geology, 2013, 157: 69-78.
- [6] Tonni L, Simonini P. Shear Wave Velocity as Function of Cone Penetration Test Measurements in Sand and Silt Mixtures[J]. Engineering Geology, 2013, 163: 55-67.
- [7] Gui M W, Bolton M D, Garnier J, et al. Guidelines for Cone Penetration Tests in Sand[C]//Proceedings of the International Conference on Centrifuge Modelling (Centrifuge '98), Tokyo, Japan, 1998: 23-25.
- [8] Bolton M D, Gui M W, Garnier J, et al. Centrifuge Cone Penetration Tests in Sand[J]. Géotechnique, 1999, 49: 543-552.
- [9] Liu Q B, Lehane B M. The Influence of Particle Shape on the (Centrifuge) Cone Penetration Test (CPT) end Resistance in Uniformly Graded Granular Soils[J]. Géotechnique, 2012, 62(11): 973-984.
- [10] Huang A B, Hsu H H. Cone Penetration Tests Under Simulated Field Conditions[J]. Geotechnique, 2005, 55(5): 345-354.
- [11] Choi W S, Son Y H, Park J S, et al. Application of Penetration in Fall Cone Test to Estimate Relative Density with Variation of Water Content for Sand[J]. Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers, 2012, 54(5): 69-77.
- [12] Walker J, Yu H S. Adaptive Finite Element Analysis of Cone Penetration in Clay[J]. Acta Geotechnica, 2006, 1(1): 43-57.
- [13] Walker J, Yu H S. Analysis of the Cone Penetration Test in Layered Clay[J]. Géotechnique, 2010, 60(12): 939-948.
- [14] Tekeste M Z, Tollner E W, Raper R L, et al. Non-linear Finite Element Analysis of Cone Penetration in Layered Sandy Loam Soil-Considering Precompression Stress State[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(5): 229-239.
- [15] Yi J T, Goh S H, Leef F H, et al. A Numerical Study of Cone Penetration in Fine-grained Soils Allowing for Consolidation Effects[J]. Géotechnique, 2012, 62(8): 707-719.
- [16] Gavin K, Tolooiyan A. An Investigation of Correlation Factors Linking Footing Resistance on Sand with Cone Penetration Test Results[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 46: 84-92.
- [17] Dejong J T, Randolph M. Influence of Partial Consolidation during Cone Penetration on Estimated Soil Behavior Type and Pore Pressure Dissipation Measurements [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(7): 777-788.
- [18] Sun T K, YAN W M. Numerical Modelling of an Object Penetrating Into a Porous Medium[C]//Proceedings of the 17th Annual Conference of HKSTAM 2013, the 9th Jiangsu-Hong Kong Forum on Mechanics and Its Application, the 3rd Symposium on the Development of Mechanics in Macau, 2013: 31.
- [19] Weil, Aab-farsakh M Y, Tumay M T. Finite-element Analysis of Inclined Piezocone Penetration Test in Clays[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, 5(3): 167-178.
- [20] Wel L. Numerical Simulation and Field Verification of Inclined Piezo Cone Penetration Test in Cohesive Soils[D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2004.
- [21] 蒋明镜, 戴永生, 王新新, 等. 一种静力触探模型箱试验装置的研制及其试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 2109-2117.
- [22] Jiang M J, Dai Y S, Cui L, et al. Investigating Mechanism of Inclined CPT in Granular Ground Using DEM[J]. Granular Matter, 2014, 16(5): 785-796.
- [23] Cundall P A, Strack O D L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [24] Jiang M J, Leroueil S, Konrad J M. Insight Into Strength Functions of Unsaturated Granulates by DEM Analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(6): 473-489.
- [25] Jiang M J, Shen Z F, Thornton C. Microscopic Contact Model of Lunar Regolith for High Efficiency Discrete Element Analyses[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 54: 104-116.
- [26] Jiang M J, Zhu F Y, Liu F, et al. A Bond Contact Model for Methane Hydrate Bearing Sediments With Inter-particle Cementation[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2014, 38(17): 1823-1854.
- [27] Jiang M J, Zhang F G, Hu H J, et al. Structural Characterization of Natural Loess and Remoulded Loess Under Triaxial Tests[J]. Engineering Geology, 2014, 181: 249-260.
- [28] Jiang M J, Yu H S, Harris D. Discrete Element Modelling of Deep Penetration in Granular Soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30(4): 335-361.
- [29] Jiang M J, Zhu H H, Harris D. Classical and Non-classical Kinematic Fields of Two-dimensional Penetration Tests on Granular Ground by Discrete Element Method Analyses[J]. Granular Matter, 2008, 10(6): 439-455.
- [30] Jiang M J, Harris D, Zhu H H. Future Continuum Models for Granular Materials in Penetration Analyses [J]. Granular Matter, 2007, 9(1-2): 97-108.
- [31] Jiang M J, Konrad J M, Leroueil S. An Efficient Technique for Generating Homogeneous Specimens for DEM Studies[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(5): 579-597.
- [32] Jiang M J, Yu H S, Harris D. A Novel Discrete Model for Granular Material Incorporating Rolling Resistance[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(5): 340-357.
- [33] 蒋明镜, 王新新. 不同贯入倾角下 TJ-1 模拟月壤静力触探模型箱试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1442-1450.